



**HAL**  
open science

## Développement de microcommutateurs MEMS RF à contact ohmique à faible tension d'actionnement

Fabienne Pennec, Patrick Pons, Anthony Coustou

► **To cite this version:**

Fabienne Pennec, Patrick Pons, Anthony Coustou. Développement de microcommutateurs MEMS RF à contact ohmique à faible tension d'actionnement. 10ème Journées Nationales du Réseau Doctoral en Microélectronique (JNRDM 2007), May 2007, Lille, France. hal-00180252

**HAL Id: hal-00180252**

**<https://hal.science/hal-00180252>**

Submitted on 19 Oct 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Développement de micro-commutateurs MEMS RF à contact ohmique à faible tension d'actionnement

Fabienne PENNEC  
LAAS – CNRS - Laboratoire d'analyse et  
d'architecture des systèmes  
7, av. du Colonel Roche-31077 Toulouse cedex 4

Patrick PONS  
Anthony COUSTOU  
LAAS-CNRS

Email : fpennec@laas.fr

## Résumé

*Les dernières études réalisées sur des microcommutateurs capacitifs montrent qu'il est difficile d'obtenir un contact capacitif parfait pour une tension d'actionnement faible. Pour supprimer ce problème, une nouvelle filière technologique de microcommutateurs série et parallèle à contact ohmique est développée. L'objectif est de minimiser la résistance de contact pour obtenir les meilleures performances micro-ondes tout en gardant une tension d'actionnement faible. La conception des microstructures nécessite alors d'optimiser les paramètres de design. Les premières structures élaborées montrent de bonnes performances RF avec des résistances de contact inférieures à  $1.3\Omega$  obtenues avec une tension de 30V pour une hauteur de gap d'air proche de  $6\mu\text{m}$ . Ainsi en réduisant la hauteur de la microstructure à  $1,5\mu\text{m}$ , une tension d'actionnement de 6V permettra de développer une force de contact suffisamment grande pour conserver une résistance de contact inférieure à  $2\Omega$ .*

## 1. Introduction

Malgré d'excellentes caractéristiques hyperfréquences (faibles pertes, faibles consommation, compacité et excellente linéarité) [1, 2, 3], les microcommutateurs MEMS RF à actionnement électrostatique présentent des performances limitées telle qu'une vitesse de commutation trop faible, une encapsulation coûteuse, et une tension d'actionnement trop élevée. Dans ce contexte, plusieurs configurations de commutateurs (capacitif ou ohmique, série ou parallèle) sont proposées pour atteindre l'objectif de faible tension d'actionnement. Le développement de ce type de microcommutateur MEMS RF pour des applications en fréquence de 2 à 5 GHz nécessite de prendre en considération à la fois les besoins micro-ondes (isolation, pertes, bandes de fréquence), le comportement électromécanique de la structure (tension d'actionnement, temps de commutation), les options et limitations des procédés technologiques disponibles en salle blanche, la déformation induite par la relaxation de la contrainte initiale des couches structurant le commutateur, la capacité du composant à supporter les variations de température et une puissance RF, ainsi que la surface disponible. La conception d'un micro-commutateur devient alors très vite complexe. Notre étude est focalisée

sur la faisabilité d'une microstructure en or de faible raideur afin de diminuer la tension d'actionnement. Une grande importance est accordée à l'effet des paramètres de design sur les performances du micro-commutateur.

## 2. Conception et fabrication

Quatre configurations de micro-commutateurs (capacitif parallèle, DC parallèle, capacitif série ou DC série) sont possibles pour réaliser l'application souhaitée dans la bande de fréquences de 2 à 5 GHz. Chaque configuration peut présenter des inconvénients. La difficulté dans la réalisation de micro-commutateurs à contact ohmique réside dans l'obtention d'une faible résistance de contact pour une faible tension d'actionnement, tandis que les difficultés dans le développement d'un micro-commutateur capacitif résident dans l'obtention d'une grande capacité à l'état bas et d'une grande inductance ( $22\text{pF}/70\text{pH}$  pour une fréquence de résonance de 4 GHz).

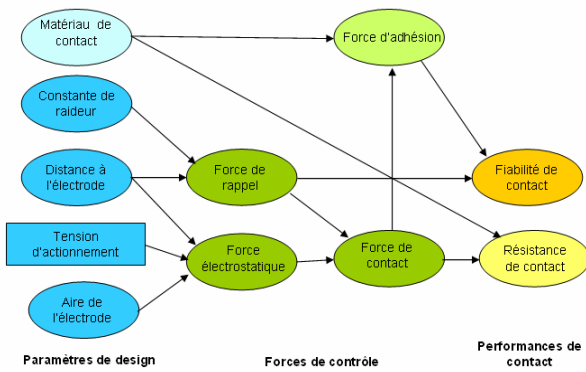
Les premiers micro-commutateurs fabriqués présentaient une configuration parallèle capacitive. Les structures en or étaient composées d'une membrane suspendue par des bras en serpentins, permettant ainsi de fournir une grande valeur d'inductance, compatible avec un bon comportement mécanique et une faible tension d'actionnement. Cependant le contact capacitif n'était pas parfait. La valeur de capacité mesurée à l'état bas n'approchait seulement que la moitié de la valeur théorique. Des études plus poussées ont montré qu'il était difficile de contrôler et de reproduire une valeur excédant  $10\text{pF}$  pour une surface de contact large et une faible raideur de microstructure.

Dans ce contexte, une nouvelle architecture et une nouvelle étape technologique permettant le contact direct métal sur métal sont proposées pour évaluer la faisabilité de micro-commutateurs à contact ohmique.

### 2.1 Optimisation des paramètres de design

Pour supprimer les problèmes liés au contact capacitif et optimiser les propriétés du contact métal/métal, de nouveaux design de micro-commutateurs série et parallèle à contact ohmique sont conçus. L'objectif est de décroître la résistance de contact afin de réduire la résistance série et ainsi augmenter l'isolation et diminuer les pertes d'insertion. Pour atteindre la performance de

contact désirée, il est nécessaire d'optimiser les paramètres de design.



**Figure 1. Relation entre paramètres de design et forces du modèle microcommutateur DC et leurs influences sur les performances du contact**

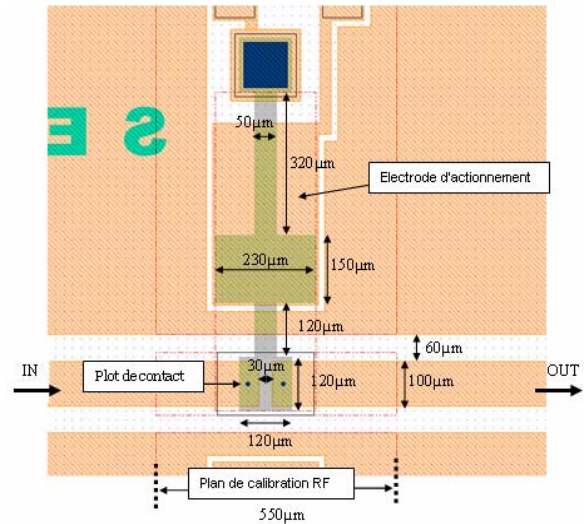
La tension d'actionnement, la hauteur de gap d'air, les forces de contact et de rappel sont des paramètres étroitement liés entre eux et rendent la conception du commutateur difficile. La figure 1 illustre les relations qui existent entre les paramètres de design et les forces du modèle ainsi que leurs influences sur les performances de contact, exprimées dans la résistance de contact et dans la fiabilité du contact. Une grande force de contact permet de réaliser une faible résistance de contact, tandis qu'une grande force de rappel est nécessaire pour améliorer la fiabilité du contact en évitant les problèmes d'adhésion de contact. Une force de rappel importante peut être obtenue avec une structure plus raide ou en augmentant le déplacement de la membrane. Cependant ces deux solutions nécessitent une force électrostatique plus grande pour permettre à la structure de passer à l'état bas et l'actionnement électrostatique doit être suffisamment important pour maintenir la force de contact désirée. Pour accroître la force électrostatique, il devient nécessaire d'augmenter la tension d'actionnement ou la surface des électrodes d'actionnement. Ainsi il est difficile de concevoir un commutateur avec une faible tension d'actionnement, de faibles surfaces d'électrodes d'actionnement pour augmenter la compacité, une hauteur de gap grande pour améliorer l'isolation RF, une grande force de rappel pour la fiabilité de contact et une grande force de contact pour réduire la résistance de contact.

Le design du commutateur nécessite alors de faire des compromis entre paramètres micro-ondes et électromécaniques tout en considérant la faisabilité du procédé technologique de fabrication.

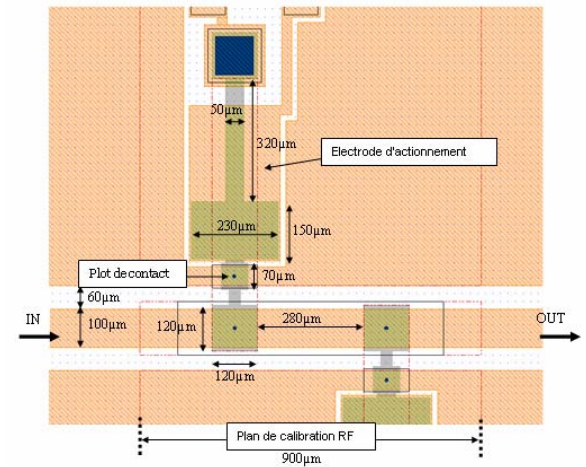
Sur la base de modèles analytiques et de simulations numériques électromécaniques, deux micro-commutateurs poutres série et parallèle constitués d'une bicouche précontrainte en or évaporé / électrolytique [7] ont été dimensionnés avec une hauteur de gap d'air de  $1.5\mu\text{m}$  pour obtenir une tension d'actionnement de l'ordre de 5V. Ce dimensionnement est compatible avec de bonnes performances RF.

## 2.2 Présentation des designs et fabrication

Les designs des structures série et parallèle sont représentés sur les figures 2 et 3. Dans la configuration série, un gap de  $30\mu\text{m}$  est créé sur la ligne centrale pour permettre une haute isolation à l'état haut. Quand une tension est appliquée entre l'électrode d'actionnement et la poutre, un court circuit se crée entre les deux extrémités de la ligne centrale.



**Figure 2. Design du microcommutateur série**



**Figure 3. Design du microcommutateur parallèle**

Dans la configuration parallèle, les deux poutres actionnées permettent d'établir le contact électrique entre le conducteur central et les plans de masse.

Les étapes de fabrication du micro-commutateur ohmique sont illustrées sur la figure 4.

Pour diminuer la tension d'actionnement, on réalise une microstructure en or de faible raideur avec un faible déplacement et des électrodes d'actionnement étendues. La hauteur de gap est alors fixée à  $1.5\mu\text{m}$ . Des plots de contact en or sur  $0.5\mu\text{m}$  d'épaisseur sont ajoutés sous la structure pour améliorer les performances de contact ce qui laisse  $1\mu\text{m}$  à la poutre à parcourir. Le micro-commutateur est composé de structures poutre en or électrolytique sur  $4\mu\text{m}$  d'épaisseur. Les lignes coplanaires et les électrodes d'actionnement sont fabriquées en or sur  $2\mu\text{m}$  d'épaisseur. Les électrodes sont recouvertes d'une

couche de nitrure de silicium PECVD sur 400nm pour assurer l'isolation électrique.

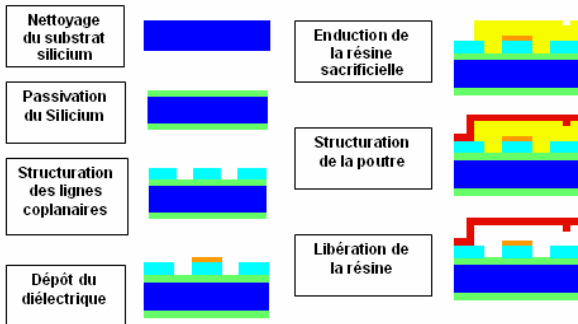


Figure 4. Description des étapes du procédé technologique de fabrication

Le contact électrique entre le plot et la ligne est ainsi un contact direct or sur or. L'or, d'après la littérature est le matériau de contact de premier choix [1, 2, 3], en raison de sa faible dureté et de sa faible résistivité qui confère une faible résistance de contact, de sa température de fusion relativement élevée et de sa capacité à résister à l'absorption de contaminants de surface.

### 3. Résultats et discussions

#### 3.1 Analyse des déformations initiales

Deux exemples de profils de poutres sont donnés en figures 5 et 6 après libération de la résine sacrificielle et séchage au CO<sub>2</sub> supercritique pour des micro-commutateurs ohmiques série et parallèle. L'enduction de la résine sacrificielle a été réalisée sur 3µm au lieu de 1,5µm. Les résultats montrent qu'il est possible d'obtenir des poutres relativement plates. Cependant, les profils de déflexion ne sont pas reproductibles d'une cellule à une autre. Ce problème de reproductibilité peut être attribué à une mauvaise planarisation de la résine sacrificielle.

Dans ces deux exemples, la hauteur de poutre approche 6µm, mais l'ensemble des valeurs s'échelonnent entre 4 et 7µm. Ces données ne sont pas compatibles avec la hauteur de gap escomptée de 3µm. Il est difficile de savoir si ce défaut est lié au dépôt de la résine (problème durant l'enduction, mauvaise planarisation) ou s'il existe une forte déformation de la poutre proche de l'ancrage. Les relevés au profilomètre optique présentent en effet une région perturbée, non mesurée sur 30 µm près de l'ancrage.

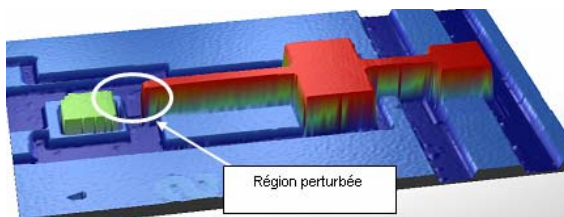


Figure 5. Relevé au profilomètre optique VEECO de la structure DC série

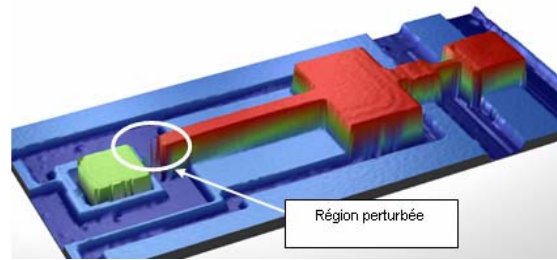


Figure 6. Relevé au profilomètre optique VEECO d'une structure poutre du micro-commutateur DC parallèle

Les déformations des poutres sont difficiles à contrôler mais elles peuvent être réduites en planarisant soigneusement la résine sacrificielle. Il faut alors prévoir de combler les marches formées par la présence des lignes coplanaires. Avant dépôt de l'or structurant les poutres, le relevé au profilomètre mécanique de la résine enduite permet de contrôler le niveau de planéité. Il peut être également prudent de renforcer la zone ancrée en épaississant l'or localement afin de réduire la rotation dans cette zone.

#### 3.2 Les résultats micro-ondes

Afin d'évaluer les pertes dans la partie active du micro-commutateur, des kits de calibration ont été utilisés pour réaliser les mesures entre les plans de calibration indiqués sur les figures 2 et 3. Les pertes enregistrées sur ces kits sont assez importantes (0.7dB/mm à 10GHz) et supérieures à celles obtenues précédemment (0.06dB/mm à 10GHz). Elles peuvent être attribuées au mauvais nettoyage RCA du silicium haute résistivité avant passivation avec l'oxyde de silicium.

Concernant le micro-commutateur série, la tension d'actionnement a été mesurée pour plusieurs poutres entre 10 et 20V. Ces valeurs sont en accord avec la hauteur de gap d'air mesurée entre 4 et 7µm. Cependant, à 10 et 20V, la force n'est pas assez grande pour établir un contact de grande qualité. Ainsi une tension de 30V a été appliquée pour assurer les meilleures performances de contact.

L'isolation du micro-commutateur série mesurée entre 1 et 5GHz est inférieure à -35 dB. Quand aux pertes elles restent inférieures à 1dB. Ces pertes sont essentiellement des pertes engendrées sur la ligne de transmission (550µm). Si ces pertes diélectriques sont soustraites du modèle électrique, les pertes, constantes, peuvent être évaluées à environ 0.2dB de 1 à 5GHz, ce qui peut être modélisé par une résistance de contact de 1.1Ω pour chaque contact électrique.

La courbe de la figure 7, extraite du modèle électrique, indique les pertes obtenues pour différentes valeurs de résistance de contact. Les pertes restent toujours inférieures à 0.5dB pour une résistance de contact inférieure à 3Ω.

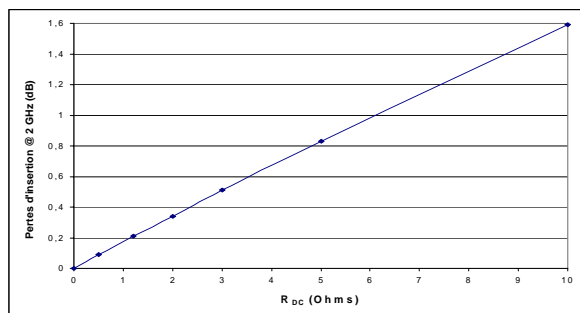


Figure 7. Pertes calculées en fonction de la résistance de contact à 2 GHz (micro-commutateur série)

Concernant le micro-commutateur parallèle, entre 1 et 5GHz, les pertes mesurées sont inférieures à 0.8dB. Ces pertes peuvent être attribuées à un problème survenu lors du nettoyage du silicium haute résistivité, comme il a été mentionné plus haut.

Sans cet effet, les courbes de simulations électriques indiquent que ces pertes seraient inférieures à 0.1dB.

A l'état bas, l'isolation du commutateur est inférieure à -12dB entre 1 et 5GHz. Cette valeur expérimentale n'est pas en accord avec la valeur simulée de -40dB et peut être due à la propagation d'un mode parasite sur la ligne centrale entre les deux poutres distantes de 280µm.

La propagation de ce mode peut être limitée en diminuant la distance entre poutres ou en fabriquant une structure symétrique au dessus de la ligne conductrice. Ainsi avec un pont, le modèle électrique indique qu'il est possible d'obtenir une isolation inférieure à -25dB tout en conservant une résistance de contact de 1.3Ω.

### 3.3 Analyse de l'effet de la tension d'actionnement sur la valeur de la résistance de contact

Afin d'évaluer l'effet de la tension d'actionnement sur les performances RF du microcommutateur, la force de contact a été simulée en fonction de la tension appliquée pour des modèles de structures poutres identiques à ceux fabriqués. Les résultats sont présentés sur la figure 8 pour trois hauteurs de poutres (1.5, 3 et 5µm).

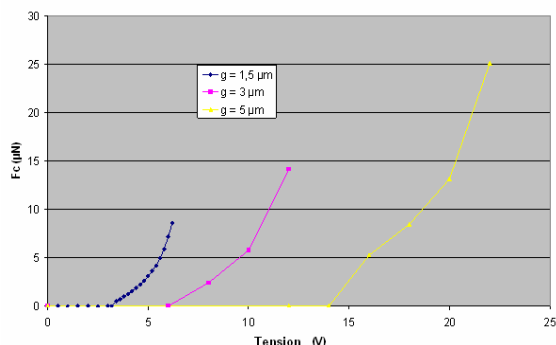


Figure 8. Résistance de contact en fonction de la force de contact pour différente hauteur de gap d'air

Le graphe montre qu'il est nécessaire de monter la tension au delà de la tension d'actionnement pour accroître la force de contact. Avec une hauteur de poutre de 1.5µm, une tension de 6V permet d'obtenir une force

de contact de 10µN. D'après la littérature, cette force sera suffisante pour engendrer une résistance de contact de valeur inférieure à 2Ω.

## 4. Conclusions

Le développement de micro-commutateur capacitif étant limité du à la difficulté de contrôler et reproduire une grande capacité à l'état bas, de nouveaux micro-commutateurs à contact ohmique série et parallèle ont été conçus et fabriqués.

Les premières structures élaborées montrent de bonnes performances RF avec des résistances de contact inférieures à 1.3Ω obtenues avec des forces de contact évaluées à 30µN. Cette force de contact a été générée avec une tension d'actionnement de 30V, étant donnée une hauteur de gap d'air supérieure à celle escomptée. Les hauteurs de poutre ont été mesurées entre 4 et 7µm au lieu des 3µm prévus, ce qui montre qu'il sera possible d'élaborer des structures activées avec une tension de 10V. Une tension de 6V peut même développer une force de contact suffisamment grande pour une hauteur de gap fixée à 1,5µm.

Les études de fabrication montrent qu'il est possible d'obtenir des microstructures quasiment plates en utilisant un procédé industriel stable pour lequel les contraintes sont parfaitement contrôlées dans les couches.

La reproductibilité est par contre difficile à atteindre dans un laboratoire de recherche. Toutefois les structures ont révélés un bon comportement et la faisabilité a été démontrée.

Ces nouveaux designs de micro-commutateurs ohmiques ne pourront être validés qu'une fois les études de fiabilité, reproductibilité et packaging réalisées.

## Références

- [1] G.M. Rebeiz and J.B. Muldavin, "RF MEMS switches and switch circuits" IEEE Microwave magazine, Déc. 2001, pp. 59-71
- [2] J.J. Yao, "RF MEMS from a device perspective", Journal of Micromechanics and Microengineering (2000), pp. R9-R38
- [3] L.E. Larson, "Microwave MEMS technology for next-generation wireless communications," Microwave Symposium Digest (1999), IEEE MTT-S International, vol.3, no.pp.1073-1076 vol.3.
- [4] G. Rebeiz, "RF MEMS Theory, Design and Technology" (2003, New Jersey: Wiley)
- [5] J. Schimkat, "Contact materials for microrelay"s, in Proc. IEEE MEMS '98, Heidelberg, Germany, 1998, pp. 190-193.
- [6] D. Hyman and M. Mehregany, "Contact physics of gold microcontacts for MEMS switches", 1999, IEEE Trans. On components and packaging technology, 22, No3, pp. 357-364
- [7] K. Yacine, F. Flourens "Biaxial initial stress characterization of bilayer gold RF-switches", European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis No16, (2005) vol. 45, no 9-11 (8 ref.), pp. 1776-1781